



اندازه‌گیری تنش در نمونه فولاد کربنی با تحلیل نویزهای مغناطیسی بارک‌هاوزن

رسول محرمی*، حمید علیزاده

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۰ خرداد ۱۳۹۵
بازنگری: ۲۹ آذر ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۵ اسفند ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۲۱ اسفند ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

اندازه‌گیری
تنش
مغناطیسی
نویز بارک‌هاوزن
فولاد کربنی

چکیده: تنش‌های پسماند ایجاد شده در فرآیندهای ساخت بر رفتار مکانیکی قطعات تاثیر گذار بوده و میتواند موجب از کارافتادگی زود هنگام قطعات صنعتی گردد. توسعه روش‌های تجربی جهت تخمین تنش‌های وارد بر قطعات از موضوعات مورد توجه محققان میباشد. در این مقاله روشی برای تخمین تنش سطحی مواد مغناطیسی مانند فولادهای کربنی، بر اساس اندازه‌گیری گسیل‌های مغناطیسی بارک‌هاوزن ارائه شده است. حرکت دیواره‌های مغناطیسی متغییر در یک قطعه دارای تنش منجر به تولید یک سری میدان‌های مغناطیسی ریز به نام نویز مغناطیسی بارک‌هاوزن می‌شود که وابسته به مقدار و جهت تنش در قطعه میباشد. در پژوهش انجام شده، دستگاه اندازه‌گیری تنش با روش مغناطیسی بارک‌هاوزن به طور کامل طراحی و ساخته شده و با اجرای تست‌های تجربی یک منحنی کالیبراسیون خطی برای تخمین تنش در نمونه‌های فولاد کربنی مورد بررسی استخراج شده است. در ادامه نتایج تخمین تنش در یک قطعه که با استفاده از منحنی کالیبراسیون بدست آمده با مقادیر مواقعی مقایسه گردیده است. طبق نتایج داده‌های حاصل از این پژوهش با دقت قابل قبول می‌تواند راهکار مناسبی برای مقایسه و اندازه‌گیری غیر مخرب و سریع خصوصیات شمیایی، فیزیکی و مکانیکی نظیر سطح تنش در قطعات فولاد کربنی باشد.

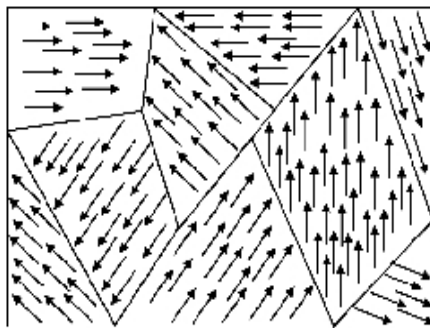


Fig. 1. Magnetic fields with random magnetic directions.

شکل ۱: حوزه‌های مغناطیسی با جهت‌های مغناطیسی تصادفی

هستند، رشد کرده و آن دسته از حوزه‌های مغناطیسی که با میدان مغناطیسی هم‌جهت نیستند، کوچکتر گردند. این حرکت‌ها در برخی از نقطه‌ها مثل نابجایی‌ها و مرزخانه‌ها به صورت ناگهانی رخ می‌دهد. این جابه‌جایی ناگهانی حوزه‌های مغناطیسی منجر به جهش مغناطیسی موضعی در برخی نقاط از قطعه می‌شود که با عنوان نویز مغناطیسی بارک‌هاوزن شناخته شده است [۱]. اولین بررسی اثر تنش بر پاسخ امواج مغناطیسی توسط دیویس هانت^۱ در سال ۱۹۴۵ صورت گرفت. او با اعمال میدان مغناطیسی با شدتی مشخص به یک قطعه فولادی، تأثیر تنش بر تغییر گذردهی مغناطیسی قطعه را بررسی

۱- مقدمه

روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری تجربی تنش وجود دارد که هر یک از این روش‌ها با ویژگی خاص خود در شرایط مختلفی به کار می‌رود. از روش‌های اندازه‌گیری تنش می‌توان به روش‌های اندازه‌گیری تنش با استفاده از اشعه ایکس، تکنیک اولتراسونیک، روش سوراخ عمیق، روش کرنش‌سنجی سوراخ و شیار گرد، روش مقطع زنی، روش لایه لایه کردن و روش‌های مغناطیسی اشاره کرد.

در طی چند دهه گذشته، توسعه روش‌های اندازه‌گیری تنش مورد توجه بوده و از نظر کمی و کیفی گسترش یافته‌اند. روش مغناطیسی نسبت به روش‌های دیگر اندازه‌گیری تنش، دارای مزایایی از جمله سرعت بالا، غیرمخرب بودن، اندازه‌گیری در محل، قیمت پایین و... است.

مواد مغناطیسی در حالت عادی از حوزه‌های مغناطیسی تشکیل شده‌اند که هر یک از این حوزه‌ها در یک جهت اتفاقی خاص آرایش یافته و در حالت کلی دارای برآیند صفر می‌باشند. در شکل ۱ حوزه‌های مغناطیسی با جهت‌های تصادفی نشان داده شده است.

زمانی که یک میدان مغناطیسی خارجی متغیر به مواد مغناطیسی اعمال می‌شود، دیواره‌های مابین حوزه‌های مغناطیسی طوری حرکت می‌کنند که آن دسته از حوزه‌های مغناطیسی که با میدان مغناطیسی اعمال شده هم‌جهت

شده و سعی بر آن است که به روشی سریع، دقیق و کاربردی در بررسی رفتار قطعات صنعتی به‌ویژه در اندازه‌گیری غیرمخرب تنش تبدیل گردد. در پژوهش انجام شده حاضر، ابتدا با بررسی عمیق تکنیک، سامانه اندازه‌گیری تنش به صورت کامل طراحی و ساخته شده و سپس نمونه‌های استاندارد آزمون کشش از جنس فولاد کربنی که دارای تنش‌هایی با اندازه و جهت معلومی هستند، با دستگاه مورد نظر آزمایش شده‌اند. داده‌های خروجی این دستگاه ولتاژهای تقویت شده‌ای هستند که به اندازه تنش موجود در نمونه وابسته‌اند. پس از ثبت ولتاژهای مربوط به هر نمونه، نمودار ولتاژ-تنش رسم شده که این نمودار بیانگر نمودار کالیبراسیون اندازه‌گیری تنش بوده و می‌تواند به منظور اندازه‌گیری تنش نامعلوم قطعات ساخته شده از این فولاد مورد استفاده قرار گیرد.

۲- طراحی و ساخت سامانه اندازه‌گیری تنش

۲-۱- اصول طراحی و ساخت سامانه

سامانه اندازه‌گیری تنش در حالت کلی شامل بخش تولید و تقویت سیگنال ارسالی، پراب اعمال میدان و دریافت سیگنال و همچنین بخش آنالیز و پردازش اطلاعات جریان دریافتی می‌باشد. به دلیل پایین بودن جریان تولیدی و سیگنال دریافتی، واحدهای تقویت‌کننده نیز در سامانه مورد استفاده می‌باشد. شکل ۲ چیدمان بخش‌های مختلف این سامانه و ارتباط بین آنها را نشان می‌دهد.

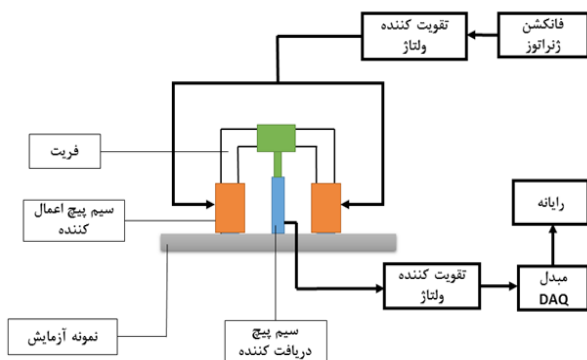


Fig. 2. The developed setup of stress measurement system with magnetic Barkhausen method.

شکل ۲: مراحل اندازه‌گیری تنش به روش بارکهاوزن

۲-۲- بخش تولید و تقویت سیگنال ارسالی

به منظور تولید سیگنال‌های الکتریکی مورد نیاز از دستگاه تابع ژنراتور استفاده شده است. سیگنال‌های تولید شده توسط فانکشن ژنراتور، دارای سطح ولتاژ پایینی بوده و به همین دلیل، تقویت‌کننده مناسبی طراحی و ساخته شده است تا سطح ولتاژ سیگنال‌های ارسالی افزایش یابد. سیگنال‌های الکتریکی پس از تقویت شدن وارد سیم‌های کویل اعمال میدان مغناطیسی می‌شوند. در شکل ۳ مدار تقویت‌کننده ولتاژ سیگنال‌های خروجی از تابع ژنراتور که دارای خروجی حداکثر ± 10 ولت است، نشان داده شده است.

کرد [۲]. در ادامه کینگ^۱ در سال ۱۹۸۳ استفاده از پاسخ مغناطیسی را در تخمین تنش مطرح نمود. طبق نتایج بررسی وی، زمانی که میدان مغناطیسی متغیر به نمونه دارای تنش اعمال می‌شود، در اثر حرکت دیواره‌های مغناطیسی، نمونه دچار انبساط و انقباض می‌شود و این رفتار وابسته به تنش وارده بر نمونه نیز می‌باشد [۳]. در سال ۱۹۸۸ جیلز^۲ در مقاله‌ای با بررسی و معرفی کاربردهای متنوع روش‌های مغناطیسی از جمله پدیده بارکهاوزن در بررسی‌های غیرمخرب پرداخت [۴]. تا سال ۲۰۰۵ تحقیقات پراکنده‌ای در رابطه با استفاده از کاربرد نوین بارکهاوزن در تخمین تنش و سایر ویژگی‌های مواد انجام شده است که جمع‌بندی تحقیقاتی انجام شده در زمینه اندازه‌گیری تنش‌های پسماند با تکنیک‌های مغناطیسی از جمله تکنیک نویزهای بارکهاوزن در سال ۲۰۰۶ توسط آزمایشگاه ملی فیزیک بریتانیا منتشر شد [۵]. در سند منتشر شده علاوه بر اصول روش‌های موجود توصیه‌های کاربردی در استفاده از این تکنیک‌ها نیز ارائه گردید. این گزارش آغاز یک توجه جدی‌تر پژوهشگران به استفاده از قابلیت‌های روش‌های مغناطیسی در تخمین تنش‌های موجود در قطعات صنعتی می‌باشد. در سال ۲۰۰۸، ویلسون^۳ اندازه‌گیری تنش مکانیکی اعمالی و تنش‌های پسماند را با مطالعه اثر تنش بر نویزهای بارکهاوزن دنبال و اثر پدیده هیستریزس بر آن را بررسی کرد [۶]. توسعه قابلیت تکنیک نویزهای بارکهاوزن در اندازه‌گیری تنش بر روی قطعات صنعتی در سال‌های بعد توسط محققانی مثل گوی^۴ و وانگ^۵ دنبال و امکان این موضوع تأیید شد [۷ و ۸].

در سال ۲۰۱۲ سورسای^۶ و در سال ۲۰۱۳ فردی^۷ با توسعه تخمین سختی یک قطعه صنعتی توسط این تکنیک، منحنی کالیبراسیونی جهت تخمین سختی در قطعه مورد بررسی ارائه نمود [۹ و ۱۰]. در ادامه گسترش دامنه کاربرد این تکنیک، ماکوسکا^۸ نیز در سال ۲۰۱۴ ضمن بررسی امکان تعیین خواص مکانیکی یک فولاد خاص با تکنیک نویزهای بارکهاوزن، وجود رابطه بین رفتار مغناطیسی فولاد، تنش تسلیم و استحکام نهایی در این فولاد را ارائه نمود [۱۱].

مشخصات نویزهای مغناطیسی بارکهاوزن دریافتی به خواص ماده از جمله جنس، ریزساختار و تنش‌های موجود بستگی داشته و تجزیه و تحلیل نویز مغناطیسی بارکهاوزن می‌تواند به روشی برای بررسی تنش و خواص مکانیکی و مثالورژیک در قطعات مغناطیسی تحت بارگذاری مثل فولادها منجر شود.

بررسی پژوهش‌های منتشر شده در این حوزه نشان‌دهنده آن است که در ده سال اخیر پیشرفت‌های مهمی در فهم اصول فیزیکی این روش انجام

- 1 King
- 2 Jiles
- 3 Wilson
- 4 Goy
- 5 Wang
- 6 Soresa
- 7 Fredy
- 8 Makosa

طرف کویل فرستنده رابطه مستقیم داشته و در نتیجه در بررسی تنش‌های لایه‌های زیرین برای آشکارسازی سیگنال‌های بارک‌هاوزن که بسامد پایینی دارد کویل دریافت‌کننده با تعداد سیم‌پیچ دور بالا مناسب خواهد بود.

در سامانه مورد استفاده در این بررسی، پراب دارای دو سیم‌پیچ است که هسته آن‌ها از نوع فولادهای الکتریکی ترانس می‌باشند. ورق‌های فولاد الکتریکی در کنار هم قرار گرفته‌اند و اسکلت پراب تشکیل شده است. به منظور اعمال میدان مغناطیسی، سیم‌لاک‌هایی به قطر ۰/۳۵ میلی‌متر به تعداد ۵۰۰ دور بر روی دو عدد از قرقره تفلونی پیچیده شده و قرقره‌ها روی هسته‌های مغناطیسی سوار شده‌اند. جهت سیم‌پیچی و قرار گرفتن سیم‌پیچ‌های اعمال‌کننده میدان مغناطیسی طوری است که میدان‌های مغناطیسی دو سیم‌پیچ هم جهت بوده و همدیگر را تقویت می‌نمایند. در شکل ۴ طرح شماتیک پراب طراحی شده نشان داده شده است.

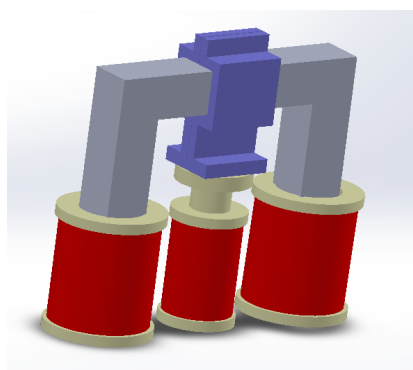


Fig. 4. The sketch of magnetic probe developed in this study.

شکل ۴: طرح پراب مغناطیسی ساخته شده در این پژوهش

به منظور دریافت میدان مغناطیسی القایی از سوی قطعه، یک کویل با سیم‌پیچ ۵۰۰۰ دور از سیم با قطر ۰/۱ میلی‌متر تهیه و به پراب U شکل اتصال داده شده است. به منظور بالا بردن حساسیت اندازه‌گیری، در قسمت میانی قرقره سیم‌پیچ دریافت‌کننده سیگنال نیز هسته فریتی قرار داده شده است که در هنگام آزمایش باید در تماس کامل با نمونه مورد نظر باشد. تعداد دورهای سیم‌پیچ در کویل دریافت‌کننده سیگنال در حساسیت سامانه تأثیر داشته و افزایش تعداد دور سیم‌پیچ دریافت‌کننده باعث افزایش قابلیت حس کردن نویزهای ضعیف‌تر می‌شود.

۲-۴- دریافت و آنالیز سیگنال بارک‌هاوزن

سیگنال‌های بارک‌هاوزن دریافت شده در کویل گیرنده بسیار ضعیف هستند و قابلیت خوانده شدن و آنالیز شدن را ندارند. به منظور افزایش سطح ولتاژ این سیگنال‌ها، تقویت‌کننده ولتاژ در مدار قرار داده شده است. در عمل مشاهده شده است که سیگنال‌ها بعد از تقویت شدن در سطح میلی‌ولت قرار می‌گیرند. سیگنال‌های دریافتی پس از تقویت‌کننده وارد مبدل آنالوگ به دیجیتال می‌شوند. سیگنال‌های بارک‌هاوزن پس از تبدیل به فرمت دیجیتال از طریق درگاه USB و با استفاده از نرم‌افزار لیبویو^۱ فراخوانی و ذخیره

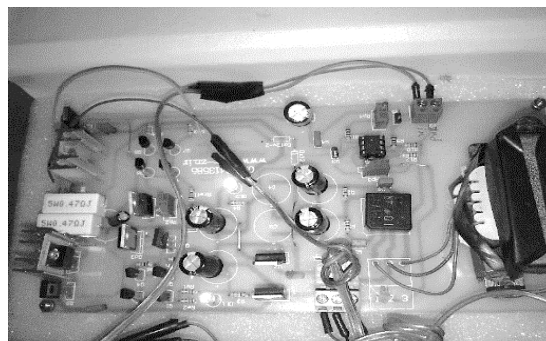


Fig. 3. Electronic circuit for amplification of voltage signals.

شکل ۳: مدار تقویت‌کننده ولتاژ سیگنال‌های ارسالی

۲-۳- پراب اعمال میدان مغناطیسی و دریافت سیگنال

در روش بارک‌هاوزن، یک پراب الکترومغناطیسی برای ایجاد میدان مغناطیسی اعمالی به نمونه و همچنین برای دریافت سیگنال‌های بارک‌هاوزن از نمونه به کار گرفته می‌شود. شدت میدان اعمالی بستگی به شکل پراب، تعداد دور سیم‌پیچ، طول سیم‌پیچ، مساحت هسته فریتی، بسامد و شدت جریان دارد. در این پژوهش پراب به شکل U در نظر گرفته شده و با انتخاب مقادیر معین برای مساحت هسته فریتی، طول کویل مغناطیسی و تعداد دور سیم‌پیچ‌ها، با داشتن اطلاعات لازم و با توجه به مقاومت واقعی و ظاهری کویل‌ها، حداکثر شدت جریان قابل عبور، حداکثر قدرت میدان مغناطیسی اعمالی و عمق قابل نفوذ شار مغناطیسی محاسبه شده است [۱۲].

در انتخاب توان سیگنال‌های الکتریکی ارسالی به کویل‌های اعمال‌کننده میدان، باید قدرت مورد نیاز میدان مغناطیسی مورد توجه قرار گیرد. با افزایش توان سیگنال‌های الکتریکی ارسالی به سیم‌پیچ‌ها، شدت میدان مغناطیسی اعمالی و مقدار نفوذ بالاتر خواهد بود. رابطه (۱) برای تخمین عمق نفوذ میدان مغناطیسی اعمالی آورده شده است.

$$H(z) = H_0 e^{-z \sqrt{\pi \mu_0 \mu_r f \rho}} = H_0 e^{-z/\delta} \quad (1)$$

در این رابطه $H(z)$ شدت میدان مغناطیسی اعمالی به قطعه در عمق Z از قطعه، H_0 شدت میدان شدت میدان مغناطیسی اعمالی به قطعه در سطح قطعه، Z عمق قطعه، μ_r و μ_0 به ترتیب ضریب گذردهی مغناطیسی در خلاء و ضریب گذردهی مغناطیسی نسبی قطعه، f بسامد سیگنال الکتریکی گذرنده از سیم‌پیچ‌های تولیدکننده میدان مغناطیسی و ρ مقاومت الکتریکی ویژه قطعه می‌باشد. با انتخاب مناسب توان جریان ورودی، این تکنیک امکان بررسی وضعیت قطعه تا عمق نفوذ داده شده میدان مغناطیسی وجود خواهد داشت.

باید توجه داشت در روش بارک‌هاوزن بسامد جریان در کویل‌های فرستنده تعیین‌کننده عمق نفوذ شار مغناطیسی و در واقع عمق اندازه‌گیری تنش می‌باشد. بسامدهای بالا (بسامدهای بالاتر از ۵۰Hz) برای آزمایش قطعه در عمق‌های کم و از بسامدهای پایین (بسامدهای پایین‌تر از ۵۰Hz) برای بررسی مشخصات مورد نظر از قطعه در عمق‌های زیرین استفاده می‌شود. بسامد سیگنال بارک‌هاوزن ایجاد شده با بسامد سیگنال اعمالی از

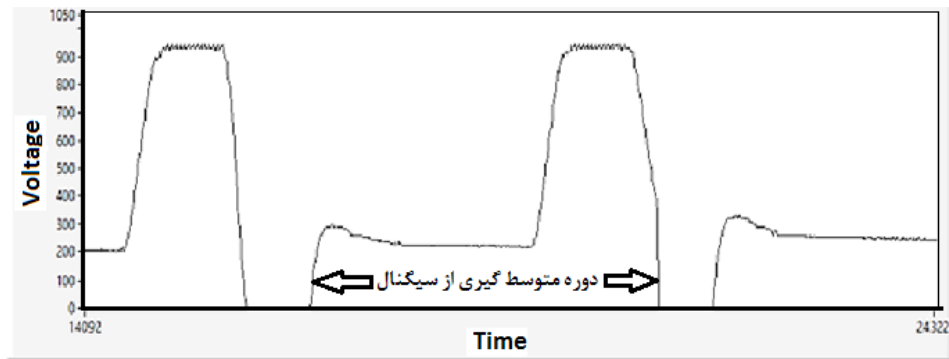


Fig. 5. Receiving signals by the coil and signal averaging period.

شکل ۵: سیگنال‌های دریافتی توسط کویل گیرنده و دوره متوسط گیری سیگنال

مورد بررسی قرار می‌گیرند. شکل ۶ نمونه‌های آزمایش را در انتهای فرایند تنش گیری نشان می‌دهد.

به جهت یکسان بودن ویژگی‌های مکانیکی و متالورژیک نمونه‌ها در طول فرآیند ساخت سعی شده همه پارامترهای فرآیند ساخت و عملیات تنش گیری و مغناطیس زدایی در شرایط یکسانی انجام گردد.

هر کدام از نمونه‌ها ابتدا در حالت بدون بار و سپس در حال اعمال تنش مشخص و ثابتی با دستگاه تست کشش با دستگاه بارک‌هاوزن بررسی می‌شوند. در هر مرحله اندازه‌گیری سه مرتبه تکرار می‌گردند و میانگین آنها به عنوان نتیجه بررسی مدنظر گرفته می‌شود. بعد از ثبت داده‌های نویز بارک‌هاوزن در تنش‌های معین، نمونه در حالت بی‌باری قرار گرفته و جهت ایجاد اطمینان بیشتر نسبت به عدم تأثیرپذیری نتایج از میدان مغناطیسی پسماند مجدداً از نظر نویز بارک‌هاوزن مورد بررسی قرار می‌گیرد. پراب به نحوی روی نمونه‌ها قرار داده شده است که میدان مغناطیسی اعمالی در جهت تنش کششی قرار گیرد. نحوه قرارگیری پراب روی نمونه‌ها، زمانی که نمونه‌ها تحت تنش هستند، در شکل ۷ آورده شده است.

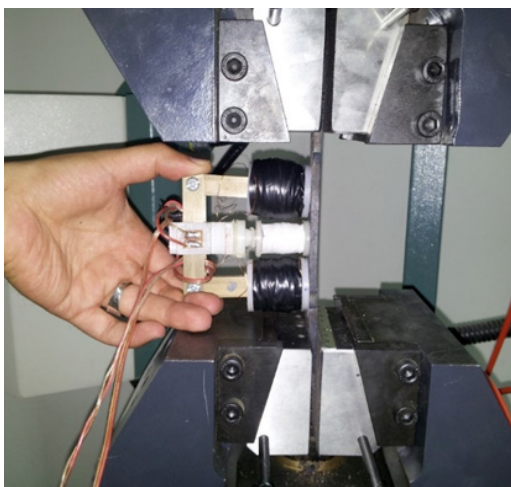


Fig. 7. Testing condition during Barkhausen signal recording.

شکل ۷: نحوه قرارگیری پراب روی نمونه تحت تنش

شده‌اند. به منظور آنالیز و مقایسه سیگنال‌های بارک‌هاوزن دریافتی، متوسط ولتاژهای سیگنال در یک دوره زمانی مشخص و با استفاده از نرم‌افزار اکسل به دست آمده است.

برای سادگی محاسبات، یک دوره زمانی از اولین صفر مقدار ولتاژ تا اولین صفر بعدی مقدار ولتاژ به عنوان دوره بررسی در نظر گرفته شده و متوسط این دوره زمانی به منظور تخمین تنش محاسبه شده است. در شکل ۵ یک نمونه از سیگنال دریافتی در حالتی که پروب روی قطعه فولادی قرار دارد و دوره در نظر گرفته شده برای متوسط‌گیری آورده شده است.

۳- بررسی تجربی نویز بارک‌هاوزن در نمونه‌های تنش دار

جهت انجام کار تجربی در پژوهش حاضر سه نمونه آزمون کشش از جنس فولاد کربنی ST37 طبق استاندارد ASTM^۱ تهیه شده است. نمونه‌ها ابتدا به دقت ماشینکاری و بعد از سخته شدن، تحت عملیات حرارتی تنش‌زدایی قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها پس از طی زمان مورد نظر در دمای تعیین شده، به آرامی تا دمای محیط سرد شده‌اند تا تنش‌های باقی‌مانده احتمالی از فرآیندهای قبلی به حد قابل قبول کاهش یابد. همچنین در انتهای فرایند آماده سازی، نمونه به جهت اطمینان از عدم وجود پسماندهای مغناطیسی



Fig. 6. Stresses relieving of the test samples by heat treatment.

شکل ۶: تنش‌زدایی نمونه‌های آزمایش با عملیات حرارتی

1 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Designation: E 8M – 00b METRIC,

جدول ۱: مقادیر متوسط سیگنالها در تنشهای اعمالی متفاوت
Table 1. The BN voltage recording in each test and its average

متوسط سری ها، mV	سیگنال گیری سوم، mV	سیگنال گیری دوم، mV	سیگنال گیری اول، mV	تنش، MPa
۲۶۱/۱	۲۵۳/۰	۲۸۲/۸	۲۴۷/۶	۰
۳۸۸/۹	۳۸۲/۹	۳۹۲/۰	۳۹۱/۸	۳۰
۴۲۴/۰	۴۸۹/۷	۴۰۷/۹	۳۷۴/۵	۶۰
۴۹۱/۴	۴۷۹/۹	۴۸۳/۴	۵۱۰/۹	۹۰

در پژوهش انجام شده، برای نمونه اطلاعات کالیبراسیون مورد نیاز برای اندازه گیری تنش بر روی فولاد ST37 با استفاده از پراب مورد استفاده در بسامد ۲۰ هرتز به دست آمده است.

برای بررسی دقت رابطه به دست آمده در تعیین تنش، مقدار متوسط سیگنال های بارکهاوزن در مورد نمونه های آزمون کشش تحت تنش های ۴۵ مگاپاسکال و ۷۵ مگاپاسکال به دست آمد. از دید دستگاه اندازه گیری تنش، تنش وارده بر این قطعات از روی نمودار کالیبراسیون به دست آمده قابل تخمین می باشد.

برای بررسی دقت روش، مقادیر ولتاژ متوسط سیگنال بارکهاوزن دریافتی از این دو نمونه با استفاده از رابطه (۲) به تنش تبدیل شده و با مقدار اعمالی مقایسه شده است.

متوسط سیگنال دریافتی توسط پراب گیرنده، مقدار تنش محاسبه شده و مقدار خطای تخمین تنش در جدول ۲ آورده شده است. در مرحله بعدی با توجه نتایج به دست آمده برای تنش های ۴۵ مگاپاسکال و ۷۵ مگاپاسکال، از این داده ها برای افزایش دقت منحنی کالیبراسیون استفاده شده است. شکل ۹ نمودار متوسط ولتاژ بر حسب تنش برای ۶ حالت بارگذاری نشان می دهد. رابطه جدید برای خط برازش شده بر نقاط شکل ۹ به صورت زیر که نسبت به رابطه قبل دارای دقت بالاتری می باشد:

جدول ۲: نتایج کاربرد رابطه (۱) در تخمین تنش

Table 2. The existing stress, average voltage and error in using Eq. (1).

تنش اعمالی MPa	متوسط سیگنال های دریافتی mV	تنش تخمین زده شده MPa	مقدار خطا (%)
۴۵	۴۰۵/۴	۵۰/۳	۱۱/۷
۷۵	۴۳۵/۳	۶۱/۹	۱۷/۴

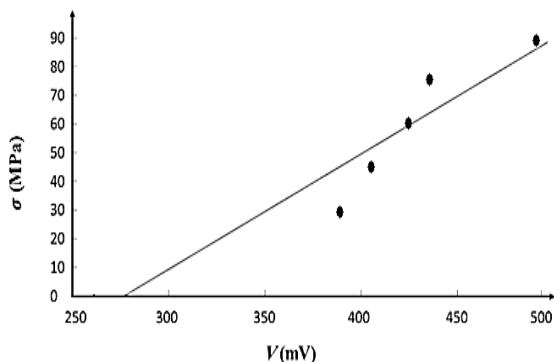


Fig. 9. Calibration graph for stress estimation in ST37 steels.

شکل ۹: نمودار کالیبراسیون تخمین تنش فولاد ST37

۴- بررسی نتایج به دست آمده آزمایش

نمونه ها در حالت بدون تنش و تحت تنش های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ مگاپاسکال مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج داده برداری در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول در تنش های اعمالی به نمونه ها، مقدار متوسط سیگنال های بارکهاوزن ثبت شده در هر بار سیگنال گیری و مقدار متوسط سیگنال برای هر تنش ثبت شده است. جهت بررسی تغییرات مقدار متوسط ولتاژ سیگنال های دریافتی بر حسب تنش های اعمالی، نمودار تنش-مقدار ولتاژ متوسط و خط تقریب زده شده بین نقاط در شکل ۸ آورده شده است.

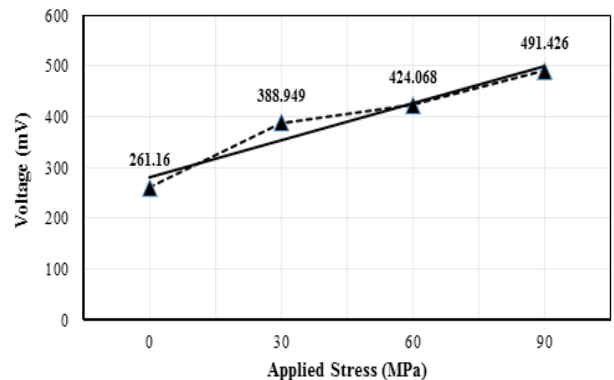


Fig. 8. Variation of average of signal voltage to existing stress.

شکل ۸: نمودار متوسط ولتاژ بر حسب تنش

همانطور که در نمودار شکل ۸ مشاهده می شود، می توان با یک انحراف قابل قبول بین مقادیر ولتاژ متوسط یک ارتباط خطی تقریب زد که رابطه خط تقریب زده شده به صورت زیر می باشد.

$$\sigma = 0.388 \times V - 107 \quad (2)$$

در این رابطه V ولتاژ بر حسب میلی ولت و σ تنش بر حسب مگاپاسکال می باشد. با داشتن رابطه فوق و اندازه گیری مقدار ولتاژ متوسط، در شرایط آزمایش نزدیک به شرایط استخراج رابطه، می توان مقدار تنش اعمالی را محاسبه کرد. قدرت سیگنال بارکهاوزن خروجی و خصوصیات دیگر آن به پارامترهایی از جمله میدان بزرگی و توزیع تنش موجود، ساختار داخلی ماده، قدرت میدان مغناطیسی اعمالی، مساحت سطح نمونه، خصوصیات پراب الکترومغناطیسی و... بستگی دارد. به علاوه خصوصیات هندسی نمونه مورد آزمایش تأثیر زیادی روی مغناطیسی شدن نمونه و سیگنال بارکهاوزن دارد؛ بنابراین لازم به نظر می رسد که برای هر هندسه، جنس و پیکربندی پارامترهای آزمایش، کالیبراسیون خاصی انجام گیرد.

تعدادی قطعه و یک مرجع را به سادگی با انجام روش کالیبراسیون توضیح داده شده اجرا کرد.

مراجع

- [1] P. J. Withers, Recent advances in residual stress measurement, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85(3) (2008) 118–127.
- [2] D. Hunt, Measurement of stress, *US Patent No. 2370845*, 1945.
- [3] J.D. King, Acoustic Barkhausen stress detector apparatus and method, *US Patent No. 4408160*, 1983.
- [4] D.C. Jiles, Review of magnetic methods for nondestructive evaluation, *NDT International*, 21(5) (1988) 311-319.
- [5] D.J. Buttle, Determination of Residual Stresses by Magnetic Methods, Measurement Good Practice Guide No.88, NPL Technical Report, *National Physical Laboratory press*, 2006.
- [6] J.W. Wilson, Residual magnetic field sensing for stress measurement, *Sensors and Actuators A Physical*, 135(2) (2007) 381-387.
- [7] H. Gur, Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique, *NDT & E International*, 43(1) (2010) 29-33.
- [8] P. Wang, Stress measurement using magnetic Barkhausen noise and metal magnetic memory testing, *Measurement Science and Technology*, 21(5) (2010) 1-6.
- [9] A. Sorsa, Quantitative prediction of residual stress and hardness in case-hardened steel based on the Barkhausen noise measurement, *NDT & E International*, 46 (2012) 100-106.
- [10] A. Freddy, Relation between magnetic Barkhausen Noise and hardness for jominy quench tests in SAE 4140 and 6150 Steels, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 32(1) (2013) 93–103.
- [11] K. Makowska, Determination of mechanical properties of P91 steel by means of magnetic Barkhausen emission, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 52(1) (2014) 181-188.
- [12] H. Alizadeh, experimental stresses analysis by Barkhausen noise method, MS Thesis, University of Zanjan, *Mechanical Engineering Department* (2015) (In Persian).

$$\sigma = 0.403 \times V - 111.4 \quad (3)$$

با قرار دادن ولتاژهای متوسط مربوط به هر یک از ۶ مورد آزمایش انجام شده در این رابطه و محاسبه تنش با عدد تنش واقعی مشخص می‌شود که رابطه (۳) در تخمین تنش یکنواخت در ضخامت، دارای دقت متوسط در حدود $\pm 10\%$ درصد می‌باشد که این دقت در تحلیل تجربی تنش مقدار قابل قبولی است.

عوامل زیادی می‌توانند در عملکرد دستگاه خطا ایجاد کنند. به عنوان نمونه در صورتی که پراب به صورت صحیح روی نمونه‌ها قرار نگیرد، به دلیل عدم اعمال کامل میدان مغناطیسی به ناحیه مورد نظر و تغییر کمتر حوزه‌های مغناطیسی، می‌تواند در تولید خطا نقش داشته باشد. همچنین اگر پهنای قطعات مورد آزمایش کمتر از پهنای سیم‌پیچ دریافت‌کننده میدان باشد، سیم‌پیچ دریافت‌کننده میدان مغناطیسی باید با قطعه مورد نظر هم مرکز باشد، در غیر این صورت میدان القایی قطعه به صورت کامل توسط سیم‌پیچ دریافت نمی‌شود و این نیز موجب خطای آزمایش خواهد شد. در صورتی که در محیط آزمایش نویزهای مغناطیسی به صورت غیرعادی وجود داشته باشند، در اعمال میدان مغناطیسی به قطعه و دریافت میدان از قطعه خلل وارد می‌شود. در اجرای آزمایش‌ها سعی شده است، با رعایت موارد فوق، خطای احتمالی به حداقل رسانده شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سامانه اندازه‌گیری تنش با روش مغناطیسی طراحی و ساخته شده و رابطه بین تنش‌های سطحی اعمالی مختلف و سطح ولتاژهای سیگنال‌های بارک‌هاوزن بررسی شده و نمودار کالیبراسیون دستگاه اندازه‌گیری تنش برای جنس فولاد ST3۷ ارائه شده است. رابطه ارائه شده در تخمین تنش‌های سطحی فولاد مورد بررسی و با پراب مورد استفاده قابل استفاده بوده و در این حالت دارای دقت قابل قبولی می‌باشد.

طبق نتایج زمانی که میدان مغناطیسی خارجی و تنش کششی در یک راستا قرار دارند، با افزایش تنش کششی، دیواره‌های مغناطیسی راحت‌تر حرکت کرده و دیواره‌های مغناطیسی به سهولت در جهت میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرند. با تحریک دیواره‌های مغناطیسی توسط تنش، سطح ولتاژ نویزهای بارک‌هاوزن نسبت به حالت بدون تنش، بالاتر رفته و متوسط ولتاژ نویزهای بارک‌هاوزن دریافتی هم افزایش می‌یابد.

با توجه به تأثیرپذیری سطح ولتاژ نویزهای بارک‌هاوزن از ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی قطعه و با توجه به این‌که توزیع تنش‌های پسماند، توزیع سختی و ریزساختار قطعات تولیدی از پارامترهای کنترل کیفیت محصول می‌باشد با این روش می‌توان مقایسه کمی و کیفی بین

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

R. Moharrami, H. Alizadeh, Stress Measurement on Carbon Steel Specimen by Consideration of Magnetic-Barkhausen-Noise, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(5) (2018) 1079-1084.
DOI: 10.22060/mej.2017.11686.5159

